

소형구조물의 레이저 용접시 미세 변형 예측에 관한 연구

A study on the prediction of micro-deformation in laser welding of small structure

장 원석*, 나 석주*

* 한국과학기술원 기계공학과

ABSTRACT In this research, newly proposed heat source equations were calculated to predict micro distortion of small structure in laser welding and compared with experimental results which were measured using laser speckle metrology. A finite element code, ABAQUS is used for the heat transfer analysis with a three-dimensional plane assumption. The results suggest that weld distortion is varied according to the heat source of the laser beam.

1. 서론

레이저에 의한 재료가공의 방법은 금속의 표면경화, 금속의 용접, 여러 가지 금속과 비금속 재료의 절단과 천공, 반도체의 어닐링과 박막의 미소가공 등 매우 다양하다. 레이저빔은 광학부품으로 초점위치에 매우 큰 에너지를 유지시킬 수 있어 통상적인 방법보다 가공이 빠르고 부품의 내부에 열로 인하여 야기되는 열응력, 뒤틀림 및 균열 등을 방지할 수 있어 부품의 손상을 최소한으로 할 수 있고 복잡한 부품의 가공도 가능하다. 본 연구에서는 이러한 레이저의 특성을 이용한 재료가공 중 최근 전자사업과 미세 부품의 접합에 있어 이용이 활발한 레이저 용접을 해석하기 위한 열원의 식을 연구하고 이용하여 이때 일어나는 미세 변형의 예측에 관하여 연구하였다.

2. 본론

2.1 열원의 방정식

선행 연구자들은 레이저 용접의 변수선정에 따른 접합부의 형상 등을 예측하기 위하여 여러 가지 수치해석 모델을 개발해 왔다. 선행연구자들에 의해 제시된 열원의 방정식들은 다음과 같다.

$$Q(x, y) = \frac{3P}{\pi r^2} \exp\left[-3\frac{(x^2 + y^2)}{r^2}\right] \quad (1)$$

$$Q(x, y, z) = \frac{2aP}{\pi r^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r^2} - az\right] \quad (2)$$

$$Q(x, y, z) = \frac{9P}{\pi r^2 z} \exp\left[-\frac{3(x^2 + y^2)}{r^2} - \frac{3z}{z}\right] \quad (3)$$

$$Q(x, y, z) = \frac{P}{\pi r^2 h} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r^2}\right] u(z) \quad (4)$$

레이저는 빔의 집속 정도에 따라 열원의 강도가 민감하게 변화되어 열전도 모드와 키홀 모드의 중간 형태를 갖는 용접부도 형성될 수 있으므로 기존에 이용된 식을 가지고 FEM해석을 할 경우 모든 범위의 조건들에 따른 접합부 형상을 예측하고 이에 따른 필요한 용접변수를 선정하는데 있어 제한점이 되고 있다. 또한 소형부품의 접합에 있어서 정확한 접합부의 온도해석은 변형에 민감한 부분에 대한 열응력 해석을 하는데 있어 반드시 선행되어야 하는 연구라 할 수 있다. 이를 위하여 제시된 열원의 식은 다음과 같다.

$$Q(x, y, z) = \frac{2P}{\pi r_{f_0}^2 d} \left(\frac{r_f}{r_{f_0}}\right)^2 \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{r_f^2}\right] u(z) \quad (4)$$

여기서 d 는 레이저빔의 침투 깊이를 정의하며 단위 부피당 생성되는 열원으로 나타내어진다. $u(z)$ 는 빔의 침투깊이까지는 1의 값을 갖고 증발이 일어나지 않는 깊이에서는 0을 갖도록 하여 각 시간마다 침투깊이(d)를 계산하여 레이저빔이 표면에서부터 점차적으로 내부로 침투되는 것으로 모델링 하였다. r_f 는 빔이 초점에서 벗어나 변화되는 유효반경이며, r_{f_0} 는 재료표면에 조사되는 레이저빔의 유효반경을 나타낸다.

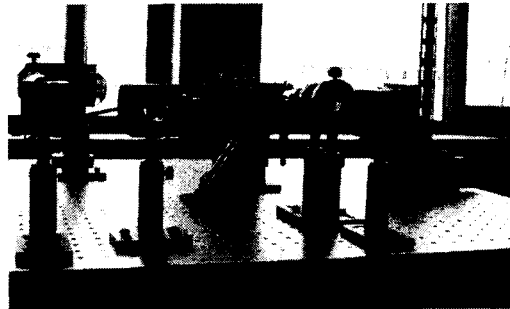
2.2 수치해석

레이저 점용접을 해석하기 위하여 해석은 3차원으로 수행하였고 용접시 발생하는 열에 의한 기계적 변형 해석을 하기 위하여 제시된 열원의 방정식을 이용하여 평판에서의 열해석을 하고 이 결과를 바탕으로 열변형 해석을 하였다. 해석대상 시편은 STS304이며 온도에 따른 물성치의 변화를 고려하였으며 끓는점 이상에서는 플라즈마가 채워져 있는 것으로 가정하였다¹¹⁾.

2.3 레이저 용접과 변위측정

수치해석으로 얻어진 결과를 검증하기 위하여 Nd:YAG 레이저를 이용하여 스폿 용접을 수행하였다. 실험조건은 0.3mm의 STS304 판재를 용접하는 것으로 하였으며 이때 나타나는 변형을 측정하기 위하여 레이저 스페클을 이용한 변위측정을 실행하였다.

스페클을 이용한 측정 방법의 기본 원리는 측정 대상물의 변형전과 후의 스페클을 비교하여 우리가 측정하고자 하는 물리적인 양을 얻어내는 것이다. 본 연구에서 관심을 두는 변위는 면외 변위로 이것은 용접 전후의 모재의 스페클을 비교함으로써 얻어지는 것으로 Fig.1과 같은 레이저 용접시스템과 전자 스페클 패턴 간섭법(electronic speckle pattern interferometry)을 이용한 측정시스템을 사용하여 실행된다. 전자 스페클 패턴 간섭법은 광학계들이 간섭계를 이루며 필름을 사용하지 않고 CCD



카메라를 사용한다. 전자 스페클 패턴 간섭법은 면내/면외 변위를 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있다.

2.4 결과 및 고찰

제시된 열원의 식에 대한 검증을 위하여 선행연구자들에 의해 제시된 식을 이용한 FEM 결과와 실험결과를 비교하였다. 식(1)은 열속의 형태로 레이저가 조사될 때를 나타낸 것인데 레이저 용접이 이루어지는 조건에서 해석을 수행할 때 레이저빔이 조사되는 부분의 가운데에서는 재료의 증발온도 이상으로 온도가 상승한 결과를 보이며 깊이 방향으로 충분히 열이 전달되지 않아 실제 실험결과와 용접부의 형상을 비교할 때 많은 차이가 있다. 이것은 레이저 점용접이 단순히 열전달의 형태로만 이루어지는 것이 아니라는 것을 알게 한다. 이와 반대로 식(2)를 사용한 경우는 처음부터 키홀이 형성되었다고 생각하고 깊이방향 전체적으로 열생성이 일어났을 경우를 나타낸다. 식(1)을 이용한 결과와는 반대로 재료의 용융온도에 조차 미치지 못한다. 이 결과로부터 키홀이 처음부터 깊게 형성되어 키홀내에서 생성된 플라즈마에 의해 레이저 흡수를 고려한 식(2)는 저파워의 박판용접을 해석

하기에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 마찬가지로 식(3)과 (4) 그리고 새로 제안된 식에 대하여도 해석을 수행하여 같은 조건에서의 레이저 용접부 단면의 결과를 비교하였을 때 Fig.2와 같이 식(3)과 새로 제안된 식이 가장 결과와 잘 일치하는 용접부 형상을 예측할 수 있었다.



Fig.2 Comparison of calculated results and experimental weld section

이 결과로부터 용접부 변형의 결과를 비교하기 위하여 식(3)과 새로 제안된 식을 이용하여 열변형 해석을 수행하고 레이저 스페클 실험을 통하여 얻어진 시편의 끝부분에서 변위의 결과를 비교하여 Fig.3과 4에 나타내었다.

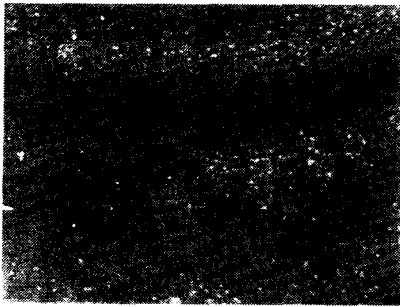


Fig.3 Fringe pattern on specimen after 4sec

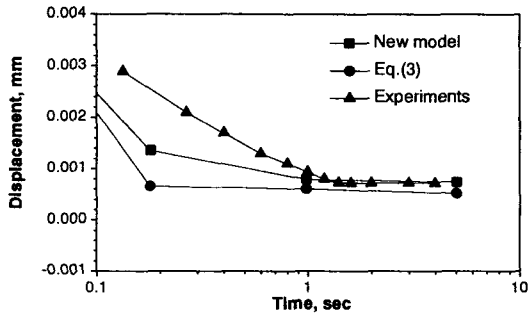


Fig.4 Comparison of calculated results and measurement of displacement

3. 결론

1) 기존의 특정모드의 용접만을 나타낼 수 있는 열원의 식을 대신하여 본 연구에서 제시된 식을 이용한 수치해석으로 이러한 레이저변수의 변화를 반영하는 용접부의 모양을 해석할 수 있었다.

2) 미세 접합부의 변형을 예측할 때는 정확한 용접부 형상을 예측하는 것이 중요하므로 변형 해석을 위해서는 정확한 열원의 방정식을 통한 열해석이 선행되어야 하며 새로 제안된 식으로부터 소형 제품의 레이저 용접시 미세변형을 보다 정밀하게 예측할 수 있었다.

참고문헌

1. J. Mazumder and W. M. Steen : Heat transfer model for CW laser material processing, J. Appl. Phys., Vol.51, No.2(1980), pp941-947
2. 장원석, 나석주 : 미세 레이저 용접에서 용융부 형상예측을 위한 열원의 방정식에 관한 연구, 대한용접학회지, 18-4(2000), pp489-494
3. V. Semak and A. Matsunawa : The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.30, No.18(1997), pp.2541-2552
4. A. Kaplan : A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.27(1994), pp.1805-1814
5. W. M. Steen : Laser material processing, (1991), Springer-Verlag
6. ABAQUS Theory Manual, Ver.5.4 (1994), Hibbitt, Kalsson & Sorensen, Inc.